Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Optimization of Hardening Heat treatment of Oil Extraction Machine’s Cylinder Made of Stainless steel

Research Article

Farzad Ahmadi Khatir [1], Mohammad Hossein Sadeghi[2], Parisa Fallahi[3]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.84186.1200

1- Introduction

Tube parts are widely used in important industries, such as aircraft, automobile, oil, and gas manufacturing, due to their high strength-to-weight ratio. Today, among the types of bending methods, rotary draw bending is known as the most common and controlled tube bending method. This research aimed to provide a method to minimize the amount of springback, as one of the tube-forming defects. One of the achievements of this study is a new method of rotary draw bending with a variable curvature bending die. Unlike conventional techniques that bend hollow tubes with a round cross-section with a fixed radius, in this method, to achieve the minimum bending radius, the tube is gradually changed from a large radius to a small radius. One of the advantages of using a die with a variable radius compared to a fixed radius is the possibility of reducing the bending ratio to improve the amount of springback. However, simultaneously, this method prevented the tube from tearing and wrinkling.

2- Simulation

In this research, in order to investigate the bending mechanism, the rotary draw bending process of the tube was modeled in the ABAQUS software. The tube geometry was modeled as three-dimensional and shell deformable (S4R), and the die components were modeled as a discrete rigid (R3D4) in the software. The workpiece was assumed to be elastoplastic with isotropic strain hardening. In order to obtain the optimal mesh size, strain convergence was used in the outer curvature of the bent tube and finally, after checking the results, the value of 0.001 m was chosen for the mesh size of the tube and the value of 0.006 m was chosen for the mesh size of the dies.

3- Experiment

In order to conduct the experiments, an aluminum 6063 tube with an external diameter of 25 mm and a wall thickness of 1.8 mm was used. In the fixed radius bending method, two bending dies were used. To determine the curve of the bending die with a variable radius, an involute curve was considered the geometric location equation of the variable curvature of the bending die, and the amount of changes in the selected bend was calculated based on an involute curve. The curvature of the bending die based on the involute curve is shown in Figure 1.

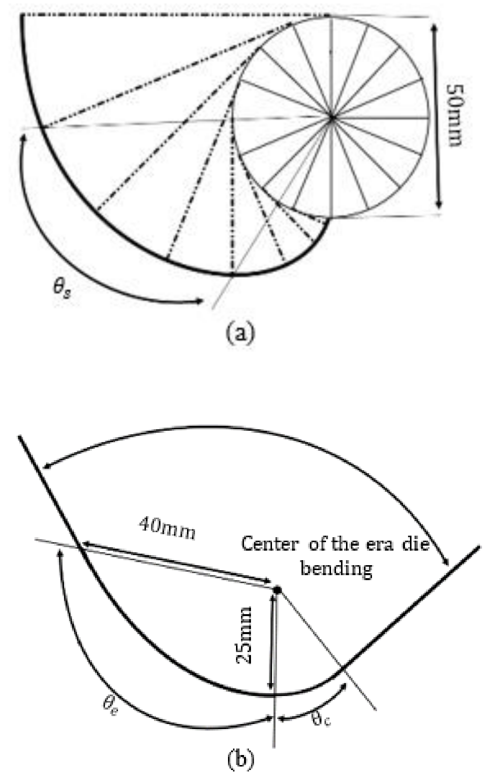


Figure 1. (a) Position of the minimum radius bending and (b) bending range with fixed radius (R=1D) and variable radius

4- Results and Discussion

In the tests of rotary draw bending, after bending, the elastically deformed part tends to return to its original

*Manuscript received: August 29, 2023. Revised, September 27, 2023, Accepted, November 12, 2023.

[1] Corresponding author: Assistant professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
Email: F.ahmadi@semnan.ac.ir

[2] Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

[3] Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

state, which leads to a decrease in θ and springback. External tension and internal pressure in the longitudinal direction of the bent tube are a major part of the tube's deformation. There are also major changes that lead to springbacks. The radius of the curvature of the bend after the springback is obtained from relations 1-3. Figure 2 shows the changes of the equivalent strain in terms of the bend radius in the case of no internal fluid pressure.

$$R' = \frac{R}{1-\frac{K}{E}\left\{\frac{d_0}{2R}+\frac{t_0}{R}\left[e^{-\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\frac{\sigma_s}{K}\right)^{\frac{1}{n}}}-1\right]\right\}^{n-1}} \quad (1)$$

$$\Delta\theta = \theta - \theta' \quad (2)$$

$$\Delta\theta = \theta \cdot \frac{K}{E} \cdot \left\{\frac{d_0}{2R}+\frac{t_0}{R}\left[e^{-\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\frac{\sigma_s}{K}\right)^{\frac{1}{n}}}-1\right]\right\}^{n-1} \quad (3)$$

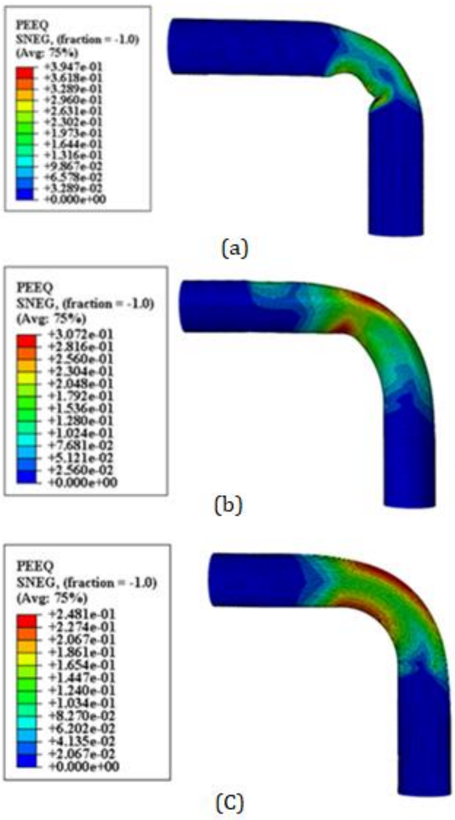


Figure 2. Equivalent strain values in different bend ratios in the state without fluid internal pressure, a) R=1D, b) R=1.6D, c) variable bend radius

5- Conclusion

The results of this research are summarized as follows:

1- The angle of the springback in the state without internal fluid pressure was measured in the ratio of bend radius to diameter 1, 1.6, and variable bend radius 1.56, 2.08, and 1.83 degrees.

2- The results showed that reducing the bending ratio had a significant effect on the springback of the tube.

3- Increasing the pressure from 0 MPa to 3.8 MPa did not affect the springback significantly.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

بهینه‌سازی سیکل عملیات حرارتی سخت‌گردانی سیلندر دستگاه روغن‌کشی ساخته شده از فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی *

مقاله پژوهشی

فرزاد احمدی خطیر(۱) محمدحسین صادقی(۲) پریسا فلاحی(۳)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.84186.1200

چکیده عملیات حرارتی سخت‌گردانی یکی از مهم‌ترین فرایندهایی است که در ساخت قطعه سیلندر دستگاه روغن‌کشی انجام می‌شود. در طول عملیات حرارتی‌دهی، تنش‌های حرارتی ایجاد شده که در حین فرایند روغن‌کشی در اثر فشار ناشی از دوران ماردون باعث ایجاد عیوب داخلی در قطعه می‌گردد که عمر مجموعه را به شدت کاهش داده و منجر به شکست آن می‌گردد. این پژوهش به مطالعه تجربی و شبیه سازی سیکل‌های عملیات حراتی سخت‌گردانی سیلندر دستگاه روغن‌کشی ساخته شده از فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۲۰ پرداخته است. از آنجایی که علت اصلی شکست قطعه سیلندر، وجود تنش‌های باقی‌مانده است، لذا سیکلی که در آن تنش پسماند قطعه کمترین مقدار است، به عنوان حالت بهینه انتخاب شده است. برای اطمینان از صحت نتایج شبیه سازی، نمونه‌های آزمایشگاهی با ابعاد مشخص از همان جنس تهیه شده و سیکل‌های مختلفی به روش تاگوچی طراحی شد. در ادامه نمونه‌های استاندارد تست کشش از نمونه‌های آزمایشگاهی سخت شده تهیه شده و رفتار مکانیکی نمونه‌ها با هم مقایسه شده است. در نهایت بهترین سیکل سخت‌گردانی با پیش‌گرم مرحله اول در دمای ۷۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه، پیش‌گرم مرحله دوم در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه، آستنیته کردن در دمای ۱۰۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه، کوئنچ در روغن ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ ثانیه، تمپر مرحله اول در دمای ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه و تمپر مرحله دوم در دمای ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی عملیات حرارتی، فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۲۰، نرم‌افزار دفرم، دستگاه روغن‌کشی پرس سرد.

Optimization of Hardening Heat treatment of Oil Extraction Machine’s Cylinder Made of Stainless Steel

Farzad Ahmadi Khatir Mohammad Hossein Sadeghi Parisa Fallahi

Abstract *Hardening heat treatment is one of the most important processes used in manufacturing the oil extraction machine’s cylinder. During heating operations, thermal stresses are created. This would lead to internal defects because of screw pressure and finally cause failure and decreases in machine life time. In this paper, different heating heat treatment cycles for an oil extraction machine’s cylinder made of stainless steel AISI420 were investigated by experimental and numerical methods. Since the residual stress is the main factor that affects the failure in the cylinder, the cycle with minimum stress is chosen as an optimum condition. The accuracy of the results of the simulation process is evaluated by providing experimental samples. Also, different heat treatment cycles were designed by the TAGUCHI method. Then, tensile test specimens were prepared from experimental samples, and their mechanical properties were compared. Finally, preheating at 790 °C for 30 minutes, the second stage preheating at 900 °C for 30 minutes, the Austenitic process at 1056 °C for 30 minutes, Quenching in oil at 80 °C for 10 minutes, the first stage tempering process at 370 °C for 90 minutes and the second stage tempering process at 370 °C for 90 minutes was considered as the best condition for hardening heat treatment cycles.*

Key Words Heat treatment, Stainless steel AISI420, DEFORM, Oil extraction machine.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۶/۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۸/۲۱ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

Email: F.ahmadi@semnan.ac.ir

(۲) استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

(۳) دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

مقدمه

اخیرا شاهد مصرف روزافزون محصولات دانه‌های روغنی هستیم که با استفاده از دستگاه‌های روغن‌کشی، عمل روغن‌گیری انجام گرفته و روغن به دست آمده مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، عملکرد دستگاه روغن‌کشی پرس سرد به این صورت است که ابتدا دانه‌ها وارد محفظه شده و با حرکت دورانی ماردون، فشاری به دانه‌ها اعمال می‌شود که در اثر این فشار، روغن از دانه‌ها خارج گردیده و از طریق سوراخ‌های قطعه سیلندر خارج می‌شود. از آنجایی که قطعه سیلندر تحت فشار زیادی قرار دارد، بنابراین می‌توان این قطعه را جزو یکی از اجزای اصلی دستگاه به شمار آورد [1].

قطعه سیلندر از دستگاه روغن‌کشی باید به اندازه کافی محکم باشد تا فشار داخلی را در حین عملیات پرس دانه روغنی تحمل کند و در عین حال از شکست ناگهانی آن جلوگیری شود. امروزه برای تولید این قطعات می‌توان از روش‌های نوین ماشین‌کاری همچون ماشین‌کاری به کمک حرارت [2] یا ماشین‌کاری سخت [3] استفاده کرد تا سیکل عملیات حرارتی به حداقل برسد اما هزینه محصول نهایی بسیار بالا می‌رود. روش تولید معمول این قطعه بدین صورت است که بعد از فرایند ماشین‌کاری، به منظور افزایش استحکام این قطعه، لازم است تا عملیات حرارتی بر روی آن انجام گیرد. بنابراین لازم است که سیکل عملیات حرارتی سخت‌گردانی سیلندر مورد بررسی قرار گیرد تا از شکست ناگهانی در اثر تنش پسماند حرارتی در قطعه جلوگیری گردد.

عملیات حرارتی فولادهای زنگ‌نزن به منظور ایجاد تغییراتی در شرایط فیزیکی، خواص مکانیکی و سطح تنش‌های پسماند انجام می‌شود. این فرایند سبب می‌شود تا ماکزیمم مقاومت به خوردگی به دست آید. اغلب می‌توان به حالتی دست یافت که ترکیبی از مقاومت به خوردگی بالا و خواص مکانیکی بهینه باشد [4].

به منظور رسیدن به خواص ذکر شده، پروسه عملیات حرارتی در چند مرحله انجام می‌گیرد. ابتدا عملیات شستشو انجام می‌گیرد. بدین صورت که برای اجتناب از آلودگی، همه قسمت‌های قطعه و قید و بندهای عملیات حرارتی باید قبل از این‌که در کوره گذاشته شوند، پاک‌سازی شوند. مخصوصا زمانی که عملیات حرارتی در یک محفظه خلأ، گریس، روغن و... انجام می‌شود [4].

بعد از عملیات پاک‌سازی، عملیات پیش‌گرمایش انجام می‌گیرد. فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی به طور کلی به‌وسیله حرارت دادن تا دمای آستنیت ۹۸۰ الی ۱۰۶۵ درجه سانتی‌گراد و سپس خنک‌کاری در هوا یا روغن سخت‌کاری می‌شوند. رسانایی حرارتی فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی کرم‌دار به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از فولادهای کربنی ساده است. شیب حرارتی زیاد و تنش زیاد در طول حرارت‌دهی سریع ممکن است باعث واپیچش و ترک در بعضی قسمت‌ها شود. بنابراین، به منظور جلوگیری از تاب و یا ترک برداشتن در ضمن آستنیته کردن، پیش‌گرم کردن قطعات به ویژه با شکل‌های پیچیده در گستره دمایی ۷۶۰ الی ۷۹۰ درجه سانتی‌گراد توصیه می‌شود. این امر برای یکنواخت کردن دما در نقاط مختلف قطعه قبل از رسیدن آن به دمای نهایی آستنیته کردن ضروری است [5].

مرحله سوم، آستنیت‌سازی است که برای سخت کردن، فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی را در گستره دمایی ۹۸۰ الی ۱۰۶۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده و سپس در روغن و یا هوا سرد می‌کنند که در واقع فرایند کوئنچ کردن انجام می‌شود. انتخاب دمای آستنیته کردن بر اساس میزان انحلال کاربید مورد نیاز و همچنین جلوگیری از تشکیل فاز فریت دلتا ناشی از گرم‌کردن اضافی است. دماهای آستنیته کردن بالاتر، منجر به انحلال بیشتر کاربید، مقاومت خوردگی بیشتر و استحکام بالاتر می‌شود. بنابراین وقتی ماکزیمم مقاومت به خوردگی و استحکام مد نظر است، فولاد باید در حد کران بالای دمای آستنیته کردن، آستنیت‌سازی شود [5].

در مرحله کوئنچ کردن به دلیل سختی‌پذیری بالای فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی، این نوع فولادها می‌توانند در هوا و یا روغن کوئنچ شوند. مقداری کاهش در مقاومت به خوردگی و نرمی در اثر کوئنچ کردن در هوا نتیجه می‌شود که ممکن است در این دسته از فولادها اتفاق بیفتد. اگرچه کوئنچ کردن در روغن توصیه می‌شود، خنک کردن در هوا ممکن است برای قسمت‌های بزرگ یا پیچیده مورد نیاز باشد تا از واپیچش کوئنچ جلوگیری شود [4].

مرحله تمپرکردن یا بازپخت به علت تنش‌های داخلی ایجاد شده در ضمن سریع سرد شدن، انجام می شود. تقریباً تمامی قطعات سخت شده نسبتاً ترد و شکننده‌اند. از این رو، به ندرت فولادها پس از سریع سرد شدن و در شرایط سخت (مارتنزیت) شده ا ستفاده می شوند [6]. ماکزیمم سختی از حد پایین دمای

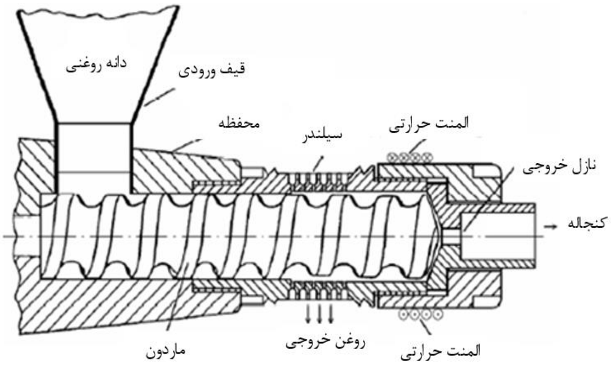
بازپخت و ماکزیمم چقرمگی از حد متو سط دمای بازپخت و ماکزیمم ا ستحکام ت سلیم از حد بالای دمای بازپخت به د ست می‌آید [4]. جدول (۱) دمای آ ستنیته و بازپخت فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۲۰ را نشان می‌دهد.

در زمینه بهینه‌سازی فرایندها و همچنین سخت‌گردانی فولادها پژوهش‌هایی انجام گرفته است که به مهم‌ترین آن‌ها در ادامه پرداخته شده است. ایسر و همکاران [7] فرایند تمپر فولاد ابزار گرم‌کار AISI H13 را در دماهای ۶۰۰ و ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد شبیه‌سازی کردند و مقدار تنش را بعد از تمپر و بعد از کوئنچ به دست آوردند. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با آزمون‌های تجربی ارزیابی شده و مطابقت خوبی داشتند. وان‌کیم و همکاران [8] عملیات کربن‌دهی رینگ اتومبیل را در دماهای ۸۰۰ و ۹۳۰ درجه سانتی‌گراد شبیه‌سازی کردند و توزیع کربن را در عمق‌های مختلف به دست آوردند. نتایج نشان داد که میزان کربن در سطح، بیشتر از عمق است و در حالتی که در در دمای بالا عملیات کربن‌دهی انجام پذیرفته است، میزان درصد کربن افزایش یافته است. هاردیان و همکاران [9]، واپیچش ناشی از عملیات حرارتی را شبیه‌سازی کردند. به منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی، دما و اعوجاج در طول عملیات حرارتی به صورت تجربی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که خطای تطابق بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی کمتر از ۱۵ درصد اندازه‌گیری شده است. لذا می‌توان از این نتایج شبیه‌سازی برای پیش‌بینی تنش پسماند استفاده کرد. آمرودراج و همکاران [10]، با در نظر گرفتن مشخصات هندسی ماردون، دو نوع محفظه طراحی کردند. در این پژوهش ماردون‌ها به صورت دوگانه در نظر گرفته شد و برای این ماردون‌های دوگانه، دو مدل محفظه طراحی کردند. حالت اول برای روغن‌کشی از یک نوع دانه است که به صورت ریخته‌گری تهیه شده و سپس عملیات ماشین‌کاری با دقت بالا انجام گردید. حالت دوم برای روغن‌کشی از دانه‌های مختلف طراحی شده و از ورق‌هایی با ضخامت معلوم تشکیل شده است که با هم مونتاژ شده‌اند. فشار ۲۴ مگاپاسکال (۲۴۰ بار) به قسمت داخلی محفظه برای هر دو حالت اعمال شده است. نتایج حاصل از تحلیل نشان داد که طراحی ماردون دوگانه از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار بوده و محفظه‌های طراحی شده تغییر شکل ناچیزی دارند.

فشار ایجاد شده در فرایند روغن‌کشی، به پارامترهای هندسی ماردون و پارامترهای عملیاتی دیگر مانند سرعت دورانی ماردون بستگی دارد [11]. سرعت دورانی، پارامتری است که به طور مستقیم روی عملکرد فرایند تأثیر نمی‌گذارد. این پارامتر با تغییر فشار و دمای سیلندر عمل می‌کند. افزایش سرعت دورانی باعث کاهش فشار و افزایش دما می‌شود [12]. بر حسب نوع پرس در نظر گرفته شده و نوع مواد خام استفاده شده، افزایش سرعت دورانی پیچ باعث افزایش روغن و یا کاهش روغن می‌شود [13,14]. در این پژوهش از فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۲۰ استفاده شده که علاوه بر استحکام بالا (مقاوم در برابر سایش دانه‌های روغنی) و قابلیت سختی‌پذیری، از لحاظ بهداشتی نیز به دلیل کار در صنایع غذایی تأیید شده است [15,16].

یکی از چالش‌های اساسی که امروزه در صنعت دستگاه‌های روغن‌کشی وجود دارد، مشکل شکست سیلندر این دستگاه‌ها می‌باشد که در ناشی از فشار وارده از طرف ماردون دستگاه می‌باشد. پژوهش‌های اندکی به بررسی سیلندر دستگاه روغن‌کشی پرداخته‌اند و اکثر پژوهش‌ها معطوف به طراحی و بهینه‌سازی ماردون این دستگاه به منظور افزایش بازدهی دانه‌های روغنی پرداختند.

هدف از این پژوهش، بررسی یکی از اجزی اصلی دستگاه روغن‌کشی به نام سیلندر می‌باشد که در اثر فشار حاصل از دوران ماردون ممکن است دچار شکست شود. فشار در یک پرس با تغییر دهانه بین ماردون و سیلندر تغییر می‌کند. در دهانه کوچک، فشار ماکزیمم در طول سیلندر ایجاد می‌شود. به هر حال این عامل مستقل نیست، چون با افزایش فشار، افزایش دما در داخل سیلندر رخ می‌دهد. به طور کلی هر قدر فشار بیشتری به دهانه وارد شود، مقدار بیشتری روغن استخراج می‌گردد. یکی از مهم‌ترین عوامل شکست ناشی از افزایش فشار، وجود تنش‌های باقی‌مانده در قطعه‌کار است. لذا در این پژوهش، هدف رسیدن به سیکل عملیات حرارتی سخت‌گردانی مناسب برای قطعه سیلندر دستگاه روغن‌کشی می‌باشد که در آن تنش‌های باقی‌مانده کمینه شده باشند. در ابتدا با کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی دفرم، سیکل‌های مختلف عملیات حرارتی (با دما و زمان‌های مشخص) به منظور یافتن کمترین مقدار تنش پسماند، شبیه‌سازی شده است. سپس نمونه‌های تجربی سیلندر مطابق طرح صنعتی ساخته شده و عملیات حرارتی مطابق سیکل‌های پیشنهادی شبیه‌سازی انجام می‌گردد. در نهایت از نمونه‌های سیلندر تست کشش ساخته شده و آزمون کشش بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد.



شکل ۱ اجزای دستگاه روغن‌کشی [1]

جدول ۱ دمای آستنیته و بازپخت فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۴۲۰ [17]

دمای آستنیته (°C)	دمای بازپخت (°C)	محیط سرد کردن	استحکام (MPa)	سختی (HRC)
۹۸۰ الی ۱۰۶۵	۲۰۵ الی ۳۷۰	هوا یا روغن	۱۵۵۰ الی ۱۹۳۰	۴۸ الی ۵۶

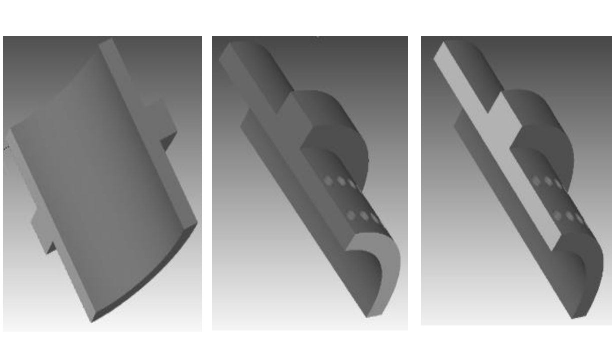
شبیه‌سازی

به منظور شبیه‌سازی فرایند لازم است تا از بین سیکل‌های عملیات حرارتی سخت‌گردانی مختلف، سیکلی را انتخاب کرد که خواص مکانیکی مطلوبی داشته باشد. یعنی ضمن رسیدن به سختی و استحکام مورد نظر، تنش پسماندی که بعد از آخرین مرحله سخت‌گردانی در قطعه باقی می‌ماند، حداقل مقدار باشد. چون هر چه مقدار تنش پسماند کمتر باشد، احتمال شکست قطعه‌کار کاهش می‌یابد. بنابراین لازم است که ابتدا با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی دفرم، سیکل‌های مختلفی با دما و زمان‌های مشخص بررسی شوند و میزان تنش پسماند نهایی در آن‌ها مقایسه شود و سیکلی که در آن تنش پسماند به کمترین مقدار می‌رسد، به عنوان سیکل بهینه انتخاب شود.

قبل از این‌که سیکل مورد نظر برای قطعه‌کار انتخاب شود، لازم است که ابتدا نمونه‌های آزمایشگاهی طراحی شوند و سیکل‌های مختلفی برای هر کدام از آن‌ها در نظر گرفته شود تا با استفاده از نرم‌افزار دفرم شبیه‌سازی شوند. در مرحله بعدی، نمونه‌ها با ابعاد طراحی شده، ماشین‌کاری شوند و سپس با سیکل‌های شبیه‌سازی شده، سخت‌کاری گردند. نهایتا از نمونه‌های آماده شده تست کشش گرفته شود.

با صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی، می‌توان از روند مورد نظر برای قطعه اصلی استفاده کرد. به طوری که سیکل‌های مختلفی را با استفاده از نرم‌افزار دفرم شبیه‌سازی نموده و با مقایسه نتایج آن‌ها، سیکلی را که تنش پسماند کمتری دارد، انتخاب نمود و بر اساس آن عملیات حرارتی سخت‌گردانی را انجام داد.

در ابتدا نمونه با کمک نرم‌افزار طراحی کتیا مدل‌سازی شده است. از آنجایی که در قطعه سیلندر و همچنین نمونه‌های آزمایشگاهی تقارن وجود دارد، لذا یک هشتم از هندسه قطعه مدل‌سازی شده و با فرمت STL وارد نرم‌افزار شبیه‌سازی دفرم می‌گردد. شکل (۲) مدل طراحی شده را نشان می‌دهد. با توجه به محیطهایی که استفاده شده است، با استفاده از پیش‌فرض نرم‌افزار ضریب انتقال حرارت به صورت جدول (۲)) به نرم‌افزار معرفی گردید [18]. اندازه مش ۱ میلی‌متر برای قطعه‌کار در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که اندازه مش‌های کوچک‌تر از این این مقدار منجر به افزایش زمان شبیه‌سازی شده در حالی که تغییراتی در خروجی تنش مشاهده نشده است. تمامی درجات آزادی قطعه‌کار با توجه به ماهیت قطعه در عمل مهار شده است. ماده به صورت الاستو پلاستیک در نظر گرفته شده است. همان طور که در جدول (۳) نشان داده شده است، تغییرات استحکام تسلیم فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰ با استفاده از نرم‌افزار JMat محاسبه شده و برای نرم‌افزار دفرم تعریف شده است. نرم‌افزار JMatPro شبیه‌سازی خواص گوناگون مواد شامل خواص فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی و... را انجام می‌دهد. این نرم‌افزار علاوه بر شبیه‌سازی و پیش‌بینی خواص گوناگون مواد، یک بانک اطلاعاتی از خواص مواد است که با انتخاب ماده مورد نظر می‌توان خواص گوناگون آن را با نمودارهای مختلف مشاهده کرد.



شکل ۲ قیدهای تقارن داده شده به یک هشتم قطعه

جدول ۲ ضریب انتقال حرارت محیط‌های مختلف [18]

ضریب انتقال حرارت	(N/sec/mm/C)
کوره	۰/۱
روغن	۵/۵
هوا	۰/۰۲

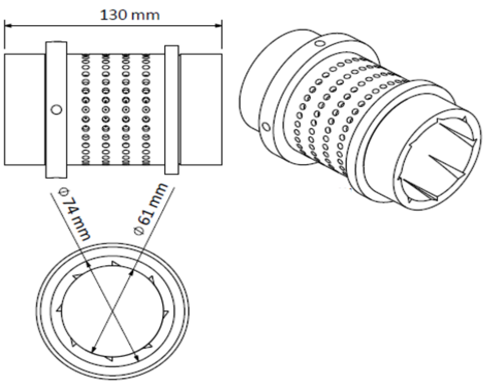
جدول ۳ تغییرات استحکام تسلیم فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰ با دما بر حسب نرخ کرنش‌های مختلف

دما (درجه سانتی‌گراد)	استحکام تسلیم با نرخ کرنش‌های متفاوت (مگاپاسگال)		
	۰/۰۱ (یک بر ثانیه)	۱ (یک بر ثانیه)	۱۰۰ (یک بر ثانیه)
۲۰	۷۲۸/۷۶	۷۸۹/۵۷	۸۵۷/۸
۱۰۰	۶۱۶/۰۱	۶۶۹/۲۴	۷۲۷/۰۸
۲۰۰	۵۸۵/۱۲	۶۳۵/۶۹	۶۹۰/۶۳
۳۰۰	۶۱۸/۲۴	۶۷۱/۶۷	۷۲۹/۷۲
۴۰۰	۵۸۷/۸۶	۶۳۸/۶۶	۶۹۳/۸۶
۵۰۰	۵۶۷/۵۴	۶۱۶/۵۹	۶۶۹/۸۸
۶۰۰	۵۵۳/۴۸	۶۰۱/۳۲	۶۵۳/۲۸
۷۰۰	۳۰۱/۹۸	۵۹۰/۴۸	۶۴۱/۵۱
۸۰۰	۱۶۳/۲۵	۴۱۰/۱۲	۴۸۷/۷۶
۱۲۰۰	۲۸/۲۱	۷۳/۴۷	۱۹۰/۹۴
۱۳۰۰	۷/۶۶	۱۹/۲۷	۴۸/۴۵
۱۴۰۰	۳/۳۳	۸/۳۹	۲۱/۰۷
۱۵۰۰	۰	۰	۰

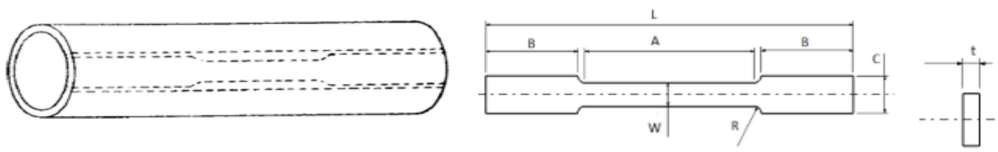
آزمایش تجربی

طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی برای انجام سیکل‌های عملیات حرارتی مختلف جهت انجام آزمون استاندارد کشش

با توجه به ابعاد سیلندر که در شکل (۳) نشان داده شده است و همچنین ابعاد نمونه‌های استاندارد کشش که در شکل (۴) و جدول (۴) آمده است، نمونه‌های آزمایشگاهی با طول و قطر و ضخامت برابر با سیلندر تهیه شده‌اند که در شکل (۵) نشان داده شده‌اند [19]. از آنجایی که سوراخ‌های سیلندر پس از انجام عملیات حرارتی با کمک فرایند سوراخ‌کاری سوپر دریل ایجاد می‌شود، لذا در نمونه‌های آزمایشگاهی نیازی به ایجاد سوراخ‌های سیلندر نبوده است.



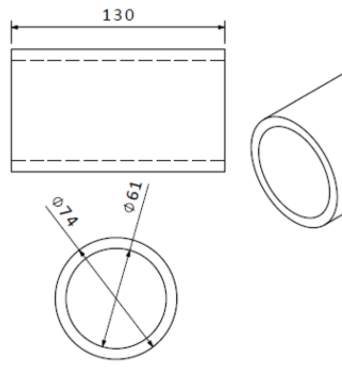
شکل ۳ ابعاد مورد نیاز سیلندر برای طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی



شکل ۴ نحوه برش نمونه استاندارد کشش از قطعات استوانه‌ای تو خالی

جدول ۴ ابعاد نمونه استاندارد تست کشش بر حسب استاندارد ASTM-E8 [19]

پارامترهای نمونه تست کشش	علامت نشان داده شده در نقشه	مقدار (میلی‌متر)
طول گیج	G	۲۵
عرض	W	۶
ضخامت	T	ضخامت ماده
شعاع فیلت	R	۶
طول کل	L	۱۰۰
طول گیره‌بندی	A	۳۲
طول قسمت کشش	B	۳۰
عرض گیره‌بندی	C	۱۰



شکل ۵ ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی برای انجام سیکل‌های عملیات حرارتی

طراحی آزمایش سیکل‌های عملیات حرارتی به روش تاگوچی با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب

با توجه به جنس نمونه‌ها، دماهای متناسب با سیکل عملیات حرارتی سخت‌گردانی مطابق آن در جدول (۵) یادداشت شده است. همچنین با توجه به ضخامت قطعه، زمان مورد نیاز در هر قسمت از سیکل نیز در جدول ثبت شده است. بنابراین با ثابت بودن دما و زمان در تمامی سیکل‌ها و نظر به اینکه سیکل سخت‌گردانی انجام می‌شود و فرایند آستنیت و کوئنچ در تمامی سیکل‌ها انجام خواهد شد، می‌توان سیکل‌های مختلفی از نظر ترتیب انجام فرایند در نظر گرفت که مستلزم طراحی آزمایش می‌باشد. فاکتورهای آزمایش و تعداد سطح آن‌ها، مطابق با جدول (۶) در نظر گرفته شده است. آزمایش به روش تاگوچی در ۱۸ سطح طراحی شده است که در جدول (۷) ثبت شده‌اند. در تمامی این سطوح با استفاده از نرم‌افزار دفرم، شبیه‌سازی انجام شده و تنش نهایی قطعه پس از پایان یافتن سیکل عملیات حرارتی به دست آمده است.

جدول ۵ دما و زمان مورد نیاز برای سیکل عملیات حرارتی سخت‌گردانی نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده از فولاد زنگ‌نزن

فرایند	دما (درجه سانتی‌گراد)			زمان (دقیقه)		
	تک مرحله	دو مرحله		تک مرحله	دو مرحله	
		اول	دوم		اول	دوم
تنش‌گیری اولیه	۸۰۰	–	–	۳۰	–	–
پیش‌گرم	۷۹۰	۷۹۰	۹۰۰	۴۵	۳۰	۳۰
آستنیته	۱۰۶۵	–	–	۳۰	–	–
کوئنچ	۸۰	–	–	۱۰ ثانیه	–	–
تمپر	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۹۰	۹۰	۹۰

جدول ۶ فاکتورهای طراحی آزمایش

فاکتور	سطوح		
	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم
تعداد تنش‌گیری اولیه (A)	۰	۱	–
تعداد تمپر (B)	۰	۱	۲
تعداد پیش‌گرم (C)	۰	۱	۲

جدول ۷ آرایه فاکتوریل کامل آزمایش‌ها

شماره آزمایش	C	B	A
۱	۰	۰	۰
۲	۱	۰	۰
۳	۲	۰	۰
۴	۰	۱	۰
۵	۱	۱	۰
۶	۲	۱	۰
۷	۰	۲	۰
۸	۱	۲	۰
۹	۲	۲	۰
۱۰	۰	۰	۱
۱۱	۱	۰	۱
۱۲	۲	۰	۱
۱۳	۰	۱	۱
۱۴	۱	۱	۱
۱۵	۲	۱	۱
۱۶	۰	۲	۱
۱۷	۱	۲	۱
۱۸	۲	۲	۱

ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و انجام سیکل‌های عملیات حرارتی سخت گردانی مختلف

با توجه به ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی، هر نمونه به طول ۱۳۰ میلی‌متر و قطر خارجی ۷۴ میلی‌متر و قطر داخلی ۶۱ میلی‌متر (به ضخامت ۶/۵ میلی‌متر) از جنس فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰ تهیه شده است. نمونه‌های ماشین‌کاری شده در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. همان طور که قبلا گفته شد، سیکل‌های مختلفی به روش تاگوچی در هجده سطح طراحی شده‌اند که از بین آن‌ها چهار سیکل با بیشترین اختلاف انتخاب شده‌اند که در جدول (۸) (الف–د) نشان داده شده است و به صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

همچنین برای محاسبه مقادیر سیگنال به نویز در تحلیل تاگوچی، با توجه به نوع خروجی مسئله (مقدار کمتر، بهتر) از معادله نشان داده شده در رابطه (۱) استفاده شده است [20].

سختی نمونه‌های سخت‌کاری شده با استفاده از دستگاه سختی‌سنجی راکول‌سی اندازه‌گیری شده است. آزمایش‌ها با وزن ۱۵ کیلوگرم انجام شده‌اند. نتایج سختی سنجی در جدول (۹) ثبت شده است.

$$\frac{S}{N} = 10\log\ [\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2] \qquad (۱)$$



شکل ۶ نمونه‌های آزمایشگاهی تهیه شده از جنس فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰

جدول ۸ سیکل‌های عملیات حرارتی برای تست تجربی

(الف)

فرایند	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان (دقیقه)
تنش‌گیری اولیه	۸۰۰	۳۰
پیش‌گرم	۷۹۰	۴۵
آستنیته	۱۰۶۵	۳۰
کوئنچ در روغن	۸۰	۱۰ ثانیه

(ب)

فرایند	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان (دقیقه)
پیش‌گرم	۷۹۰	۳۰
آستنیته	۱۰۶۵	۳۰
کوئنچ در روغن	۸۰	۱۰ ثانیه

(ج)

فرایند	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان (دقیقه)
پیش‌گرم	۷۹۰	۴۵
آستنیت	۱۰۶۵	۳۰
کوئنچ در روغن	۸۰	۱۰ ثانیه
تمپر ۱	۳۷۰	۹۰

(د)

فرایند	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان (دقیقه)
پیش‌گرم	۷۹۰	۴۵
آستنیت	۱۰۶۵	۳۰
کوئینچ در روغن	۸۰	۱۰ ثانیه
تمپر ۱	۳۷۰	۹۰
تمپر ۲	۳۷۰	۹۰

جدول ۹ مقدار سختی در نقاط مختلف از سطح نمونه‌ها

شماره نمونه	نقطه ۱	نقطه ۲	نقطه ۳	نقطه ۴
۱	۵۶	۵۹	۵۷	۶۰
۲	۵۵	۵۸	۵۸	۶۰
۳	۵۰	۴۸	۵۲	۵۱
۴	۵۰	۴۸	۵۲	۵۰

تهیه نمونه‌های استاندارد تست کشش از نمونه‌های آزمایشگاهی سخت شده مطابق با استاندارد ASTM E8

پس از انجام سیکل‌های عملیات حرارتی سخت‌گردانی مختلفی بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی، مطابق با استاندارد ASTM E8، نمونه‌های استاندارد تست کشش [21] با استفاده از برش وایرکات مطابق شکل (۷) تهیه شده است. برای نمونه‌های تهیه شده، با استفاده از دستگاه تست کشش، آزمون کشش انجام شد.



شکل ۷ نمونه‌های استاندارد تست کشش

بحث و نتایج

آزمایش‌هایی که در ۱۸ سطح به روش تاگوچی طراحی شده بودند، با استفاده از نرم‌افزار دفرم، شبیه‌سازی شدند و میزان تنش پسماند در هر آزمایش به دست آمد که در جدول (۱۰) نتایج آن

ثبت شده است. همان طور که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود، بیشترین تأثیر برای کمینه شدن تنش، ناشی از مرحله تمپر کردن دو مرحله‌ای است. در مرحله تمپر کردن، سختی قطعه‌کار کاهش پیدا کرده و چقرمگی آن افزایش می‌یابد. تمپر مرحله دوم به عنوان تنش‌گیری نهایی از قطعه، در کمینه کردن تنش پسماند تأثیر دارد. از بین این آزمایش‌ها، چهار آزمایش که بیشترین اختلاف را در مقدار تنش پسماند داشته‌اند، به صورت تجربی بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی انجام شدند. نمونه‌های استاندارد تست کشش برحسب استاندارد ASTM E8 از نمونه‌های آزمایشگاهی تهیه شد و تست کشش بر روی نمونه‌ها انجام شد که میانگین نتایج هر دو تست از یک نمونه در جدول (۱۱) ثبت شده است و نمودار حاصل از آزمون‌ها در شکل (۹) نشان داده شده است. نمونه‌های شماره (۱) و (۲) که در نتیجه شبیه‌سازی، تنش پسماند بیشتری نسبت به نمونه‌های (۳) و (۴) داشتند، به صورت ترد و شکننده هستند و نمونه‌های شماره (۳) و (۴) نسبت به آن‌ها انعطاف‌پذیرترند که این موضوع اهمیت تمپر کردن در کاهش تنش پسماند را نشان می‌دهد. نمونه‌های (۱) و (۲) که در مرحله تنش‌گیری اولیه با هم اختلاف داشتند، در میزان تنش پسماند حاصل از شبیه‌سازی اختلاف چندانی باهم نداشتند. به طوری که مقادیر آن‌ها ۷۹/۶ و ۷۵/۱ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است. در تست تجربی نیز نمودار حاصل اختلاف چندانی با هم ندارد. لذا برای جلوگیری از اتلاف زمان و هزینه، می‌توان از این مرحله صرف‌نظر کرد. با توجه به اینکه از ماکزیمم دمای آستنیته برای سخت‌گردانی استفاده شده است، بنابراین بهتر است پیش‌گرم به صورت دو مرحله‌ای انجام شود که از اعوجاج‌های احتمالی جلوگیری گردد.

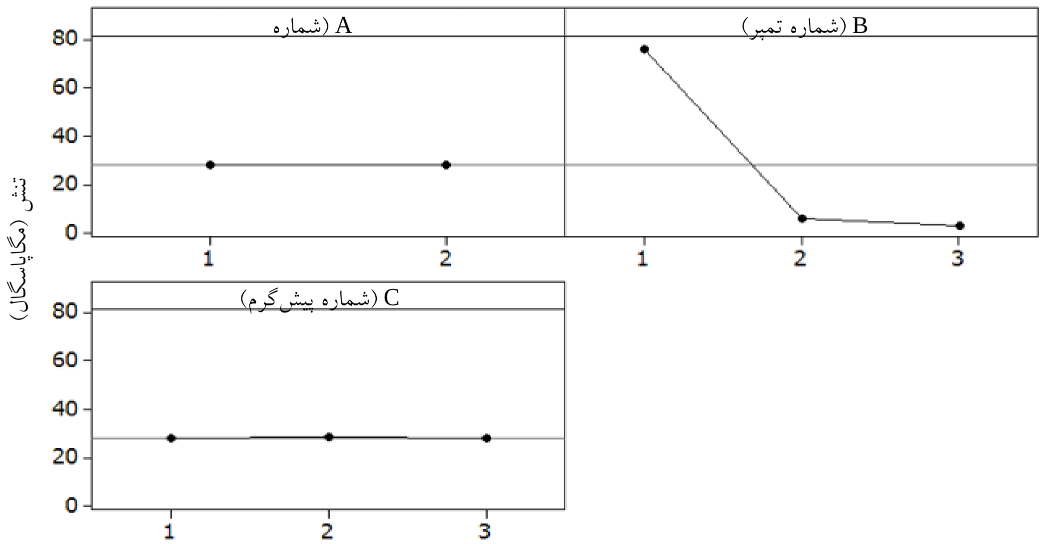
نمونه‌های شماره (۳) و (۴) که در مرحله تنش‌گیری نهایی (تمپر مرحله دوم) با هم اختلاف داشتند، در میزان تنش پسماند حاصل از شبیه‌سازی به صورت جزئی با هم اختلاف داشتند. مقادیر به دست آمده ۵/۸۹ و ۳/۱۵ مگاپاسکال به دست آمده است. نمودار حاصل از تست تجربی آن‌ها نیز به صورت جزئی با هم اختلاف دارند. بنابراین برای تنش‌زدایی از قطعه و کمینه‌کردن تنش پسماند، بهتر است مرحله تنش‌گیری نهایی انجام شود.

جدول ۱۰ مقدار تنش پسماند در آزمایش‌های شبیه‌سازی شده

شماره آزمایش	مقدار تنش پسماند (مگاپاسکال)
۱	۷۶/۳
۲	۷۵/۱
۳	۷۴/۹
۴	۵/۷۱
۵	۵/۸۹
۶	۵/۹۲
۷	۳/۰۴
۸	۳/۱۵
۹	۳/۱۷
۱۰	۷۴/۷
۱۱	۷۹/۶۱
۱۲	۷۵
۱۳	۵/۶۲
۱۴	۵/۸۲
۱۵	۵/۸۴
۱۶	۲/۹۹
۱۷	۳/۱
۱۸	۳/۱۱

بنابراین با توجه به دلایل ذکر شده، در این پژوهش برای سخت‌گردانی سیلندر ساخته شده از فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰، سیکل عملیات حرارتی به صورت پیش‌گرم مرحله اول در دمای ۷۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه، پیش‌گرم مرحله دوم در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه، آستنیته کردن در دمای ۱۰۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه، کوئنچ در روغن ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ ثانیه، تمپر مرحله اول در دمای ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه و تمپر مرحله دوم در دمای ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه پیشنهاد می‌گردد. برای تشخیص فازهای تشکیل‌دهنده نمونه مطابق شکل (۱۰) تهیه شده و زیر میکروسکوپ مشاهده شده است. همان طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده، فازهای تشکیل‌دهنده در نمونه مارتنزیت تمپر شده با توده‌های کاربایدی بوده است. منحنی سیکل حرارتی پیشنهادی و همچنین منحنی تنش آن در مراحل مختلف به ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، میزان تنش در مرحله کوئنچ کردن یعنی مرحله

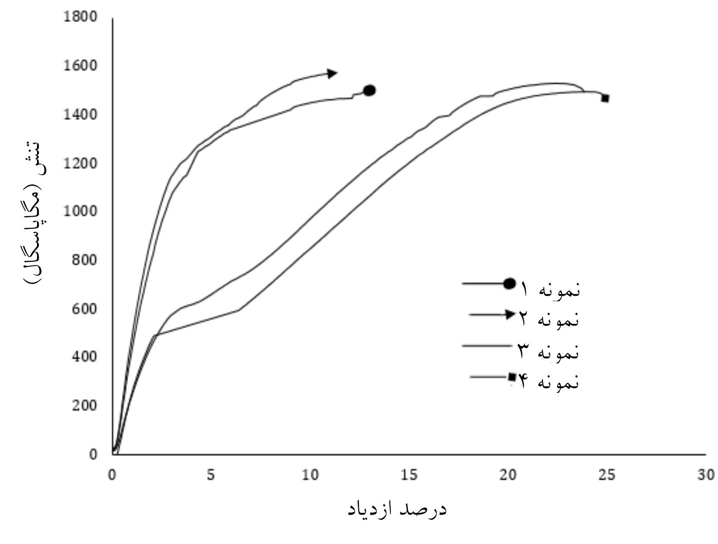
تشکیل مارتنزیت به ماکزیمم مقدار می‌رسد و بعد از تمپر کردن میزان تنش کاهش پیدا کرده و نهایتا بعد از تنش‌گیری نهایی (تمپر مرحله دوم)، به کمترین مقدار خواهد رسید. همچنین نمودار تنش در مراحل مختلف در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، میزان تنش در مرحله کوئنچ کردن یعنی مرحله تشکیل مارتنزیت به ماکزیمم مقدار می‌رسد و بعد از تمپر کردن میزان تنش کاهش پیدا کرده و نهایتا بعد از تنش‌گیری نهایی (تمپر مرحله دوم) به کمترین مقدار می‌رسد.



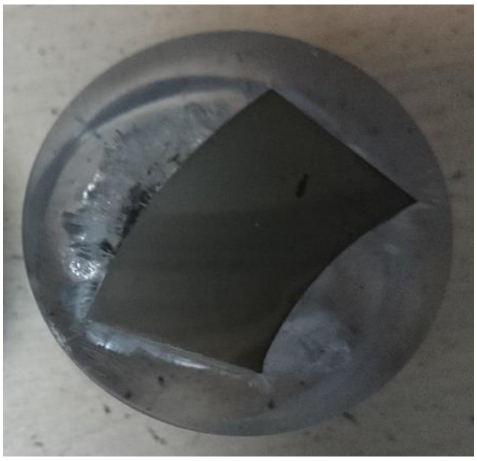
شکل ۸ تأثیر پارامترها (تنش‌گیری، تمپر و پیش‌گرم) بر روی کمینه‌کردن تنش

جدول ۱۱ نتایج حاصل از تست کشش نمونه‌های سخت شده

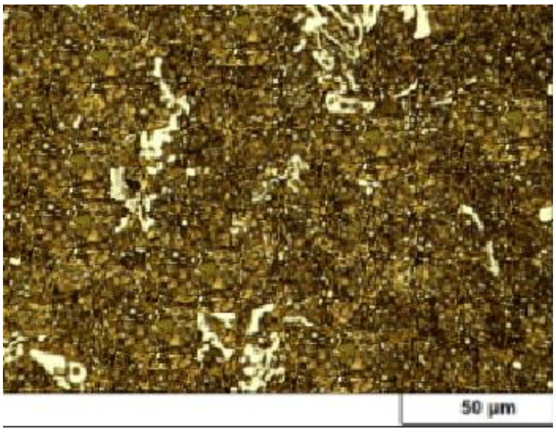
شماره نمونه	استحکام تسلیم (مگاپاسگال)	استحکام نهایی (مگاپاسگال)	درصد ازدیاد طول (٪)	نیروی شکست (کیلو نیوتن)
۱	۹۰۰	۱۵۰۰	۱۳	۵۸/۵
۲	۸۵۰	۱۵۵۰	۱۱/۴۴	۶۱/۴۴۷
۳	۵۵۰	۱۴۵۰	۲۳/۸	۵۸/۲۴۶
۴	۵۰۰	۱۴۵۰	۲۴/۹	۵۷/۱۴۳



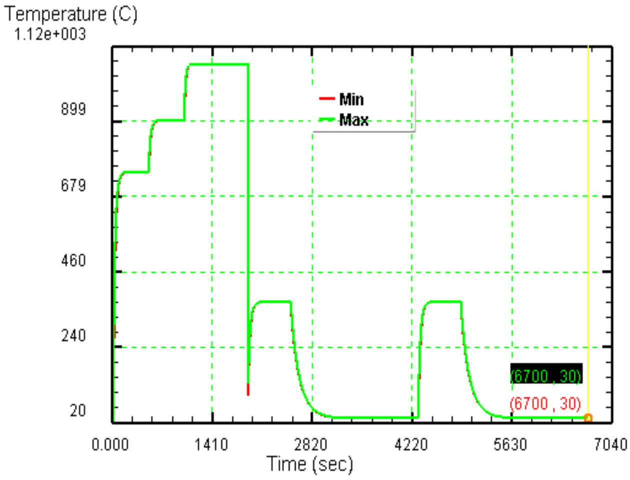
شکل ۹ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تست شده



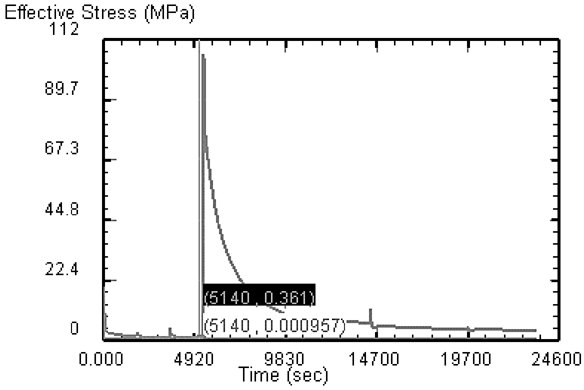
شکل ۱۰ نمونه تهیه شده برای تشخیص فازهای نمونه ۴



شکل ۱۱ فاز مارتنزیت تمپر شده نمونه ۴



شکل ۱۲ سیکل حرارتی در چرخه سخت‌گردانی بهینه



شکل ۱۳ تنش ایجاد شده در چرخه سخت‌گردانی بهینه

نتیجه‌گیری

با فرض بر اینکه تنش‌های پسماند موجود در قطعه سیلندر، باعث کاهش عمر و در نتیجه شکستن قطعه بعد از مدت کوتاهی می‌گردد، بنابراین در این پژوهش سعی بر آن بود که برای سخت‌گردانی قطعه سیلندر، سیکل‌های مختلفی با دما و زمان مشخص تحلیل گردید. نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر خلاصه می‌گردد:

۱. پارامتری که در کمینه کردن تنش ایجاد شده در قطعه در اثر عملیات حرارتی تأثیر دارد، مربوط به مرحله تمپر بوده است. این مهم به صورت تجربی و شبیه‌سازی نشان داده شده که نشان از هم‌خوانی مناسب بین نتایج بوده است.

۲. مراحل تنش‌گیری اولیه و پیش‌گرم تأثیر چندانی در تنش ایجاد شده نداشتند که به صورت شبیه‌سازی و تجربی نیز نشان داده شده و مقایسه گردید.

۳. برای سخت‌گردانی سیلندر ساخته شده از فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰، بهترین سیکل عملیات حرارتی به صورت پیش‌گرم مرحله اول در دمای ۷۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه، پیش‌گرم مرحله دوم در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه، آستنیته کردن در دمای ۱۰۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه، کوئنچ در روغن ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ ثانیه، تمپر مرحله اول در دمای ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه و تمپر مرحله دوم در دمای ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه به دست آمده است.

واژه نامه

روش سطح پاسخ	**Response Surface Methodology**
روش تاگوچی	**Taguchi Method**

نرم افزار مینی تب	**Minitab Software**	کوئینچ	**Quenching**
روش اجزای محدود	**Finite Element Method**		
بازپخت	**Tempering**		
آستنیته	**Austenite**		

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] R. Savoire, J.L. Lanoisellé, and E. Vorobiev, "Mechanical continuous oil expression from oilseeds: a review". *Food and Bioprocess Technology*, vol.6, pp.1-16, (2013). DOI:10.1007/s11947-012-0947-x

[2] F.A. Khatir, M.H. Sadeghi and S. Akar, "Investigation of surface roughness in laser-assisted hard turning of AISI 4340. Materials Today", *Proceedings*, vol.38, pp.3085-3090, (2021).https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.480

[3] J.P. Davim, Machining of hard materials. Springer Science & Business Media, (2011).

[4] C. C., Joseph, Persson, and M.H. Colliander, "Influence of Heat Treatment on the Microstructure and Tensile Properties of Ni-Base Superalloy Haynes 282". *Materials Science and Engineering: A*, vol. 679, pp.520-530. (2017).

[5] M.A. Golazar, Principles and application of heat treatment of steels, Esfahan industrial university, vol.14, (1390).

[6] S. Atlas, Atlas steels technical handbook of stainless steels, Atlas Steels Technical Department, Australia, (2003).

[7] A. Eser, C. Broeckmann and Simsir, C.A.N.E.R., "Multiscale modeling of tempering of AISI H13 hot-work tool steel–Part 2: Coupling predicted mechanical properties with FEM simulations", *Computational Materials Science*", vol.113, pp.292-300, (2016).https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.11.024

[8] D.W. Kim, H.H. Cho, W.B. Lee, K.T. Cho, Y.G. Cho and S.J. Kim, and H.N. Han, " A finite element simulation for carburizing heat treatment of automotive gear ring incorporating transformation plasticity" , *Materials & Design*, vol.99, pp.243-253, (2016). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.047

[9] Beckermann RH. Simulation of Heat Treatment Distortion. Research Engineer, 2Professor, Department of Mechanical and Industrial Engineering.

[10] M. Amruthraj , H.B. Bharath, S. Kamini, H.S. Chethan, " Design of Twin Screw Oil Expeller for Pongamia Pinnata Seeds", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 4, no.3, pp.631-638, (2014).

[11] L.A. Jacobsen, L.F. Backer, " Recovery of sunflower oil with a small screw expeller ", *Energy in Agriculture*, vol.5, no. 3, pp.199-209, (1986). https://doi.org/10.1016/0167-5826(86)90019-7

[12] V.S. Vadke, F.W. Sosulski, " Mechanics of oil expression from canola". *Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol.65, no7, pp.1169-1176, (1988). https://doi.org/10.1007/BF02660576

[13] R . Akinoso, A.O. Raji and J.C. Igbeka, " Effects of compressive stress, feeding rate and speed of rotation on palm kernel oil yield ", *Journal of Food Engineering*, vol.93, no4, pp.427-430, (2009). https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.02.010

[14] R.L. Evangelista, " Oil extraction from lesquerella seeds by dry extrusion and expelling", *Industrial Crops and Products*, vol.29, no.1, pp.189-196, (2009). https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.04.024

[15] I. Mašín and M. Petrů, " Complex approach to conceptual design of machine mechanically extracting oil from Jatropha curcas L.seeds for biomass-based fuel production", *BioMed Research International*, vol.2016, (2016). https://doi.org/10.1155/2016/7631458

[16] A.T. Salawu, M. Isiaka and L. Suleiman, " Development of an Oil Extraction Machine for Jatropha curcas Seeds ", *Journal of Scientific Research & Reports*, vol.*6, no.*4, pp.313-328, (2015).

[17] ASM Metal Handbook Volume 04-Heat Treating.

[18] B. Bagheri, M. Abbasi, "Simulation using DEFORM software ", Kian publisher, (1393). (in Persian)

[19] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM E8 / E8M – 13, (2013).

[20] M. Moradian, A. Doniavi, V. Modanloo and V. Alimirzaloo, " Process parameters optimization in gas blow forming of pin-type metal bipolar plates using Taguchi and finite element methods ", *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology* , vol.10, no.2, pp.101-108, (2017)

[21] M. Elyasi, F. Ahmadi Khatir and M. Hosseinzadeh, " Investigation of die clearance in rubber pad forming of metallic bipolar plates ", *AUT Journal of Mechanical Engineering*, vol.1, no.1, pp.89-98, (2017). DOI: 10.22060/mej.2016.719